

Mestrado Integrado em Engenharia Química

**Estudo da influência da Temperatura e da Carga de líquido na
transferência de massa gás – líquido**

Tese de Mestrado

desenvolvida no âmbito da disciplina de

Projecto de Desenvolvimento em Ambiente Académico



Universidade do Porto

Faculdade de Engenharia

FEUP

DEQ

Departamento de
Engenharia Química

por

Armando Francisco Vieira de Oliveira

Sob a orientação de

Professor Doutor Fernando Alberto Nogueira da Rocha

em

Fevereiro de 2009

Agradecimentos

Fica aqui um agradecimento sincero a algumas pessoas que me ajudaram e deram força a iniciar e a desenvolver este trabalho.

Ao Senhor Professor Fernando Alberto Nogueira da Rocha pela sua vontade e disponibilidade e interesse em me aceitar como seu aluno, por me ter facilitado as instalações do laboratório, pelo qual é responsável, e também pelas suas valiosas contribuições e ensinamentos.

Aos “colegas de laboratório”, Doutor António Ferreira pelos seus ensinamentos e opiniões e apoio ao longo de todo o trabalho.

Ao futuro Doutorando Vasanth Kumar pela sua ajuda sempre que necessária.

Ao Doutor Pedro Mena por toda a cedência de informação.

A toda a boa vontade do pessoal técnico e administrativo do Departamento.

A todos bem hajam.

Resumo

Este trabalho vai no sentido de complementar trabalhos já realizados neste laboratório, na área da transferência de massa gás-líquido, e no caso concreto, ar reconstituído – água por J. Costa, 2008 e Mena, 2005, de forma a identificar as discrepâncias dos valores encontrados por estes autores.

Neste projecto monitorizou-se a transferência de massa num sistema bifásico: ar reconstituído-água, numa coluna de borbulhamento, tendo-se utilizado água da torneira e água ultrapura (desmineralizada). Estudou-se ainda a influência na transferência de massa da:

- Temperatura ;
- Altura de líquido;
- Velocidade superficial do gás;
- Tipo de água.

Para este estudo utilizou-se um método dinâmico para obtenção do coeficiente volumétrico de transferência de massa gás-líquido ($k_L a$). O eléctrodo usado para a medição do oxigénio dissolvido foi do tipo polarográfico.

No estudo do coeficiente volumétrico de transferência de massa gás-líquido ($k_L a$) obtiveram-se os seguintes resultados:

- Em todas as situações, a um aumento da velocidade superficial do gás (U_g) correspondeu sempre um aumento dos valores de $k_L a$;
- Quanto mais alta a temperatura maior o valor de $k_L a$;
- A carga de líquido tem alguma influência no valor de $k_L a$;
- Quanto mais alta for a temperatura menor é a influência da carga de líquido.
- O valor de $k_L a$ é influenciado pela presença de iões em solução. O valor de $k_L a$ para a água da torneira é superior ao da água ultrapura.

O controlo da temperatura neste processo é fundamental, deve-se verificar que a temperatura do gás seja a mais próxima possível do líquido de modo a fazer com que a temperatura na interface gás-líquido seja perfeitamente conhecida.

Nesse sentido teve-se que encontrar um processo para promover o aquecimento do gás, visto que a sua temperatura de armazenagem era sempre inferior à temperatura das nossas experiências, o que foi conseguido através de banhos termoestáticos, como adiante se mostrará.

Palavras-chave:

Transferência de massa, Coluna de borbulhento, $K_L a$, Sistema bifásico.

Abstract

This work goes in the direction of complementing works already carried out in this laboratory, in the area of gas-liquid mass transfer, in the present case air – water, by J. Costa, 2008 and Mena, 2005, in order to identify the discrepancies of the values found by these authors.

In this project the mass transfer in a two-phase system was monitored: air-water in a bubble column. Tap water and ultrapure water were used. The following effects on mass transfer were studied:

- Temperature;
- Height of the liquid;
- Superficial gas velocity;
- Type of water.

For this study, we used a dynamic method to obtain the volumetric gas-liquid mass transfer coefficient (k_La). A polarographic electrode was used to measure the dissolved oxygen.

In the study of the volumetric gas-liquid mass transfer coefficient (k_La), we obtained the following results:

- In all cases to an increase of the superficial gas velocity, U_G , corresponds always an increase of K_La values;
- Higher the temperature value, higher is the value of K_La ;
- The liquid height has some influence in K_La value;
- Higher the temperature value, lower is the influence of the liquid height.

The K_La value is influenced by the presence of the ions in solution. The K_La value for the tap water is higher than for ultrapure water

The control of the temperature in this process is important. The temperature of the gas has to be the nearest possible of the liquid temperature in order the temperature in the interface gas-liquid be perfectly known.

In this direction we had to find a process to promote the heating of the gas, since its temperature of storage was always inferior to the temperature of our experiences, what it was obtained through the use of thermo static baths.

Keywords:

Bubble column; mass transfer; k_La ; diphasic system.

Notação e Glossário

A	Área interfacial total gás-líquido	m^2
a	Área interfacial específica (baseada no volume do líquido sem sólidos)	$m^3 m^{-3}$
C_G	Concentração do componente difusivo no seio do gás longe da interface	$mol\ m^{-3}$
C_G^i	Concentração do componente difusivo na interface, do lado gás	$mol\ m^{-3}$
C_L	Concentração do componente difusivo no seio do líquido, longe da interface	$mol\ m^{-3}$
C_L^i	Concentração do componente difusivo na interface, do lado líquido	$mol\ m^{-3}$
C_L^*	Concentração de saturação do componente difusivo no líquido que está em equilíbrio com a fase gasosa	$mol\ m^{-3}$
C_L^0	Concentração do componente difusivo no seio do líquido, longe da interface, no início da contagem do tempo	$mol\ m^{-3}$
D_{G-L}	Difusividade molecular do gás no líquido	$m^2\ s^{-1}$
D_m	Difusividade molecular	$m^2\ s^{-1}$
$D_{m\text{ oxigénio}/\text{água}}$	Difusividade molecular do oxigénio na água	$m^2\ s^{-1}$
$D_{m\text{ oxigénio}/\text{ar}}$	Difusividade molecular do oxigénio no ar	$m^2\ s^{-1}$
H	Constante de Henry	-
J	Fluxo molar	$mol\ m^{-2}\ s^{-1}$
K_L	Coefficiente global de transferência de massa baseado no filme do lado do líquido	ms^{-1}
k	Coefficiente de transferência de massa	ms^{-1}
k_G	Coefficiente pelicular de transferência de massa do gás	ms^{-1}
k_L	Coefficiente pelicular de transferência de massa do líquido	ms^{-1}
$k_L a$	Coefficiente volumétrico de transferência de massa gás-líquido	s^{-1}
Q	Caudal molar do componente difusivo	$mol\ s^{-1}$
R^2	Coefficiente de correlação	-
t	Tempo	s
U_G	Velocidade superficial do gás	$m\ s^{-1}$
V_L	Volume de líquido	m^{-3}

Letras gregas

ΔC	Variação da concentração
δ	Espessura do filme
δ_G	Espessura do filme do lado do gás
δ_L	Espessura do filme do lado do líquido

Índices

G
i
L
m
*

Gás
Interface
Líquido
Molecular
Saturação

Índice

1. Introdução	1
1.1. Colunas de borbulhamento	2
1.2. A transferência de massa	4
1.2.1.A transferência de massa molecular	4
1.2.2.A transferência de massa convectiva	5
1.2.3.A transferência de massa gás/líquido	5
1.2.4.A teoria da película estagnada	5
1.2.5.O coeficiente volumétrico de transferência de massa gás/líquido	9
2. Descrição experimental	11
2.1. Sistema experimental	11
2.2. Procedimentos experimentais	12
2.2.1.Procedimentos para estabilização térmica do banho de aquecimento do gás	12
2.2.2.Procedimentos para a calibração do medidor de oxigénio dissolvido	12
2.2.3.Procedimentos para a saturação da coluna de água com ar	13
2.2.4.Procedimento para calculo do $k_L a$	14
3. Resultados e discussão	16
3.1. O sistema bifásico ar reconstituído/água da torneira	16
3.1.1.Influência da temperatura e da velocidade superficial do gás	16
3.1.2.Influência da carga e da velocidade superficial do gás	20
3.2. Sistema ar reconstituído/água ultrapura	22
3.2.1.Influência da temperatura e da velocidade superficial do gás na transferência de massa no sistema ar reconstituído/água ultrapura	23
3.2.2.Influência do tipo água na transferência de massa a diferentes temperaturas	24
4. Conclusões	26
5. Avaliação do trabalho realizado	27
5.1. Objectivos atingidos	27
5.2. Limitações e trabalho futuro	27
5.3. Apreciação final	28
6. Referências	29

Anexo A – Esquema da montagem laboratorial

Anexo B – Esquema e características da coluna de borbulhamento

Anexo C – Tabela de valores de concentração de saturação de oxigénio em água, experimentais e de literatura

Lista de figuras

Figura 1 - Mapa dos regimes para colunas de borbulhamento, adaptado de Kantarci, et al.

Figura 2 - Perfil ilustrativo da concentração do oxigênio dissolvido nas vizinhanças da interface gás/líquido, segundo a Teoria da Película Estagnada, adaptado de (Chisti, 2007). O perfil real, ainda que próximo a este, distingue-se pela sua curvilinearidade próximo da fronteira de fases.

Figura 3 - Comportamento da concentração de oxigênio dissolvido durante a determinação dinâmica do coeficiente volumétrico de transferência de massa gás/líquido.

Figura 4 - Esquema do prato perfurado, distribuidor de gás estático.

Figura 5 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_L a$) com a velocidade superficial do gás (U_G), a diferentes temperaturas para a carga de 1,3 L.

Figura 6 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_L a$) com a velocidade superficial do gás (U_G), a diferentes temperaturas para a carga de 1,8L.

Figura 7 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_L a$) com a velocidade superficial do gás (U_G), a diferentes temperaturas para a carga de 2,3L.

Figura 8 - Comparação dos valores $k_L a$ obtidos neste trabalho e em trabalhos anteriores nas mesmas condições de temperatura e carga.

Figura 9 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_L a$) com a velocidade superficial do gás (U_G), a diferentes cargas para a temperatura de 20°C.

Figura 10 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_L a$) com a velocidade superficial do gás (U_G), a diferentes cargas para a temperatura de 25°C.

Figura 11 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_L a$) com a velocidade superficial do gás (U_G), a diferentes cargas para a temperatura de 30°C.

Figura 12 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_L a$) com a velocidade superficial do gás (U_G), à temperatura de 20°C, 25°C e 30°C.

Figura 13 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_L a$) com a velocidade superficial do gás (U_G), para a água da torneira e água ultrapura à temperatura de 20°C.

Figura 14 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_L a$) com a velocidade superficial do gás (U_G), para a água da torneira e água ultrapura à temperatura de 30°C.

1. Introdução

O estudo da transferência de massa em sistemas bifásicos, ar-água, tem uma elevada importância na química industrial, bioquímica e ambiente. É sem dúvida o ponto de partida para o estudo de sistemas trifásicos (ar/água/sólidos) que se encontram nas diferentes áreas industriais.

A transferência de massa que corresponde basicamente à oxigenação da água através da transferência de massa do ar para a água, assume assim uma importância determinante.

É um processo que pode parecer simples e de fácil estudo, mas apresenta várias condicionantes nem sempre fáceis de controlar.

Iremos, neste estudo, verificar a importância do factor temperatura neste processo, bem como a possível influência da carga (entenda-se, altura de líquido na coluna) e da velocidade superficial do gás.

O estudo da influência da temperatura neste processo assume uma importância determinante. Sabemos à partida que a temperatura tem uma enorme influência em todos os processos físico-químicos. Este não será certamente uma excepção.

Iremos também, tentar entender a influência da altura de líquido na coluna de borbulhamento. Esta influência poderá ser de grande importância para o projecto dos reactores.

Ir-se-á aprofundar o estudo da influência da velocidade superficial do gás, que sabemos à partida é relevante no processo de transferência de massa.

Por fim iremos tentar fazer uma pequena abordagem da influência da qualidade da água na transferência de massa do ar para a água, utilizando dois tipos de água: água da torneira e água desmineralizada (ultrapura).

Iremos, para este estudo, utilizar uma coluna de borbulhamento, em que o líquido estará sujeito a um controlo de temperatura, bem como o gás (ar reconstituído) que estará também sujeito a um controlo de temperatura. Pretender-se-á que as duas temperaturas, a do líquido e a do gás, sejam mais próximas possível. Pensamos que dessa forma, mantendo a temperatura do gás o mais próxima possível da do líquido conseguiremos evitar alguns efeitos termodinâmicos que poderão ser negativos para a transferência de massa.

1.1. Colunas de borbulhamento

São equipamentos muito utilizados em transferência de massa gás-líquido em que um gás é distribuído sob a forma de bolhas e entra em contacto com o líquido. O objectivo é promover o contacto entre as fases, e dessa forma provocar a transferência de massa. Estes equipamentos podem ser projectados com diversas modificações, dependendo do fim a que se destinam (Zehner ; Kraume, 2005).

Existe nestas colunas um distribuidor de gás que através dos seus orifícios produz as bolhas gasosas. A distribuição gasosa é feita de maneira a que as bolhas sejam distribuídas de modo uniforme para maximizar a transferência de massa. Existem dois tipos de distribuidores, o estático e o dinâmico, podendo dentro destes dois tipos existir várias configurações.

No distribuidor estático a formação de bolhas ocorre sem o fornecimento adicional de energia do exterior. Nos distribuidores dinâmicos usa-se a energia do jacto líquido para dispersar o gás.

A configuração mais vulgar entre os distribuidores de gás utilizados nas colunas de borbulhamento é de *prato perfurado*. Os diâmetros dos orifícios variam geralmente entre 0,5 mm a 3 mm. Estes orifícios são distribuídos por vértices de triângulos equiláteros, distanciados entre 15 mm a 20 mm (Jamialahmadi, et al., 2001).

Podemos encontrar três tipos diferentes de escoamento: homogéneo, heterogéneo e “slug” (Figura 1-1). Existe também um outro, mais raro, chamado “foaming regime” (Kantarci, et al., 2005).

No regime homogéneo, as bolhas são uniformemente distribuídas na base da coluna. O tamanho das bolhas formadas não varia muito. Neste regime as bolhas formam-se e emergem num percurso aproximadamente helicoidal, com poucas colisões e pouca coalescência, para um baixo caudal (Jamialahmadi, et al., 2001).

No regime heterogéneo as bolhas já não são distribuídas de um modo uniforme, à medida que a velocidade aumenta o tamanho das bolhas também aumenta, quer na ponta dos orifícios, quer ao longo da coluna por efeito da coalescência (aglomeração das bolhas).

Neste regime o mecanismo de formação de bolhas não é igual àquele que se verificava a velocidades mais baixas. Neste caso, as bolhas formadas na ponta dos orifícios chocam com as suas antecessoras, podendo ou não separarem-se posteriormente (Jamialahmadi, et al., 2001). Este regime também é conhecido por regime de coalescência.

Em colunas de pequeno diâmetro que trabalham com altos caudais gasosos, em que as bolhas, ou conjunto de bolhas, sobem a “grande” velocidade pode acontecer o terceiro regime, o regime slug. O resultado causado também pela tensão de corte da parede, resulta neste perfil característico (Zehner ; Kraume, 2005).

Apesar da velocidade do gás ser um factor importante na distribuição do tamanho das bolhas na coluna (Wang et al, 2007) e do diâmetro da coluna também o ser, essa distribuição também vai depender de outros factores tais como as propriedades do líquido (ex. força iónica,

viscosidade, tensão superficial), da presença de agentes tensioactivos, da forma e do tipo de distribuidor de gás (Anderson;Quinn, 1970).

Tendo em conta todas estas circunstâncias não existe uma separação clara entre os regimes dado que os limites da zona de transição indicados na Figura 1 não são rigorosos.

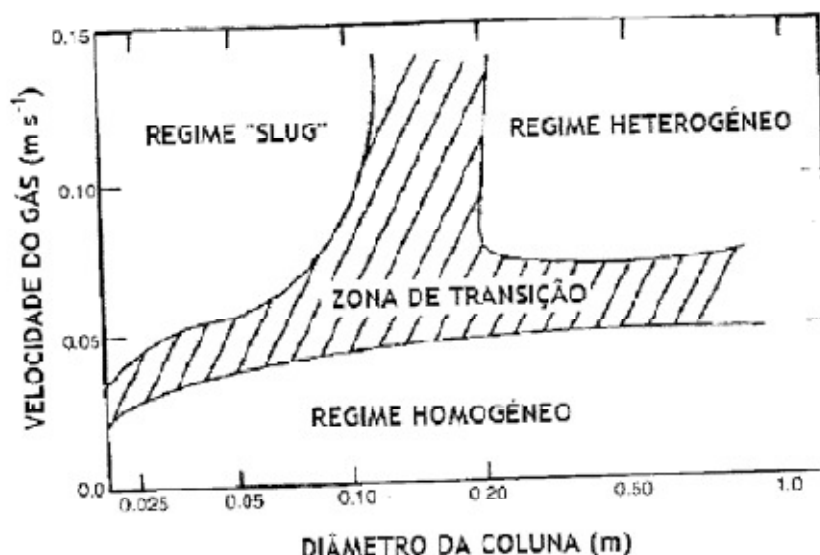


Figura 1 - Mapa dos regimes para colunas de borbulhamento, adaptado de Kantarci, et al.

Convém referir por último que o uso de colunas de borbulhamento é grande e muito abrangente. É utilizado em várias indústrias tais como na indústria bioquímica, indústria alimentar, indústria ambiental entre outras.

Tal como todos os equipamentos também as colunas de borbulhamento apresentam vantagens e desvantagens na sua utilização. As principais vantagens que poderão existir são:

- Manutenção relativamente reduzida;
- Construção simples com custos relativamente baixos;
- Áreas interfaciais elevadas, a que correspondem coeficientes de transferência de massa globais elevados;
- Bom controlo da temperatura
- Possibilidade de reacções lentas devido a altos tempos de residência do líquido;
- Boas taxas de transferência de calor por unidade de volume de reactor.

As principais desvantagens que poderemos considerar são:

- Ocorrência de fenómenos de coalescência com a consequente diminuição de área interfacial gas-liquido;
- Podem ocorrer quedas de pressão gasosas;
- Pode acontecer escoamento não ideal junto às paredes da coluna em ambas as fases.

O eléctrodo utilizado para a medição da concentração de oxigénio na coluna, foi um eléctrodo polarográfico. Neste tipo de eléctrodos ocorre uma reacção redox em que a corrente é usada como medida da fugacidade do oxigénio que vai sendo reduzida.

Os valores obtidos são enviados para o medidor. Ter-se-á que garantir uma agitação suficiente em torno da membrana de maneira a que a dinâmica do eléctrodo não afecte a aquisição de dados (Mena, 2005).

1.2. Transferência de massa

Entende-se por transferência de massa um fenómeno em que a massa é transportada de um ponto com alta concentração para um outro de baixa concentração. O mecanismo de transferência depende do sistema e da dinâmica desse mesmo. Poder-se-ão classificar dois tipos de transferência de massa (Welty, et al. 2008):

- Transferência de massa molecular;
- Transferência de massa convectiva.

Convém referir que estes dois mecanismos podem ocorrer em simultâneo, mas um desses mecanismos poderá sobrepor-se e dessa forma ser dominante, possibilitando assim soluções com uma boa aproximação.

1.2.1. Transferência de massa molecular

Acontece quando as concentrações de um determinado componente variam de ponto para ponto, de uma forma espontânea e natural e ocorre uma movimentação de massa no sentido de diminuir as desigualdades na composição (Welty, et al., 2008). Este mecanismo ocorre em sistemas com dois ou mais componentes. A difusão molecular ocorre por origem, em:

- Diferença de temperaturas;
- Diferença de pressões;
- Diferença de campos magnéticos;
- Diferença de campos eléctricos.

1.2.2. Transferência de massa convectiva

Este tipo de transferência de massa ocorre entre um fluido em movimento e uma superfície, ou entre fluidos móveis imiscíveis separados por uma interface móvel (Welty et al., 2008).

Existem duas formas de transferência de massa por convecção:

- Convecção natural: acontece quando o movimento de fluidos é causado pela diferença de densidades;
- Convecção forçada: acontece quando algo exterior causa o movimento de fluidos.

1.2.3. Transferência de massa gás/líquido

A transferência de massa gás/líquido ocorre com frequência em processos químicos e pode ter ou não uma reacção química associada (exemplo: hidrogenação). No caso de não haver reacção, a absorção e a desorção são dos fenómenos mais frequentes.

Em processos biotecnológicos é frequente a transferência de gases (exemplo: oxigénio) para soluções líquidas, normalmente aquosas, para promover a cultura de microrganismos.

No caso em estudo a transferência de massa ocorre em colunas de borbulhamento e é costume assumir-se para estes equipamentos os seguintes sistemas básicos:

- O sistema isotérmico;
- O sistema isobárico;
- O sistema corresponde a uma mistura perfeita

1.2.4. Teoria da película estagnada

Esta teoria baseia-se no pressuposto da presença de um filme fictício de um fluido em regime laminar. Assenta em que toda a resistência à transferência de massa reside num filme fictício em que o transporte é feito inteiramente por difusão molecular (Welty, et al., 2008). Ainda que possa ser uma aproximação pobre para muitos sistemas reais em que a espessura do filme não é logicamente uniforme ao longo da área de secção recta à transferência de massa, é a abordagem mais simples (Middleman, 1998). De grande utilidade para o entendimento básico dos coeficientes de transferência de massa através de uma simples imagem (Bird, 1960).

A teoria do filme estagnado representada na figura, é a teoria utilizada para a explicação deste processo de transferência de massa. O trajecto do elemento absorvido, neste caso, o oxigénio, da fase gasosa para a fase líquida, está representado na Figura 2.

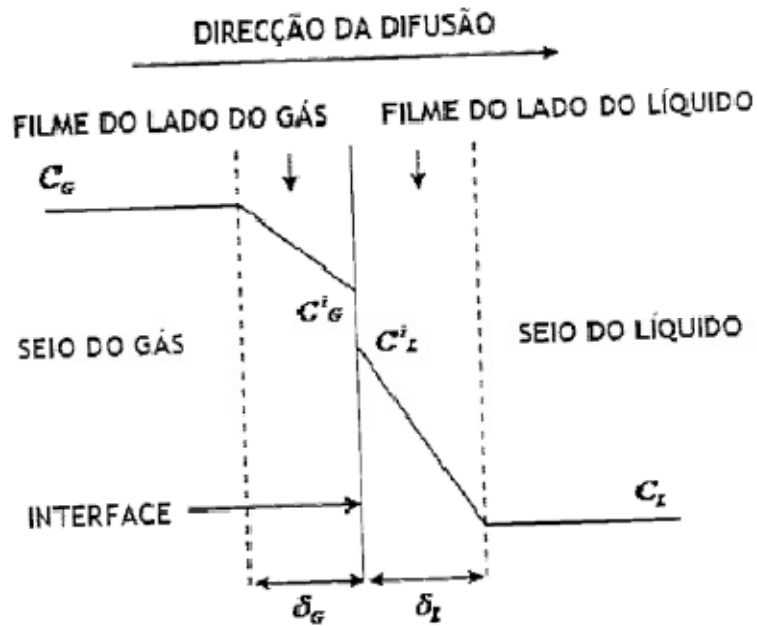


Figura 2 - Perfil ilustrativo da concentração do oxigênio dissolvido nas vizinhanças da interface gás/líquido, segundo a Teoria da Película Estagnada, adaptado de (Chisti, 2007). O perfil real, ainda que próximo a este, distingue-se pela sua curvilinearidade próximo da fronteira de fases.

No caso em estudo, o ar passa através de um filme de ar estagnado passando depois por um filme de líquido estagnado em que cada filme do seu lado tem a interface a servir como limite de fase. A resistência à transferência de massa está localizada nos filmes estagnados tal como diz a teoria de filme estagnado.

Assume-se que na interface gás/líquido, não existe nenhuma resistência à transferência de massa (Chisti, 2007). Considera-se portanto que a interface está em equilíbrio e que o processo cinético para o transporte de massa é muito rápido. Assume-se também que todo este processo se desenvolve em estado estacionário, ou seja, assume-se que nos filmes não se consome nem se gera, nem acumula espécies difusivas. Assim sendo, os filmes apresentam perfis de concentração linear.

A transferência de massa nos filmes ocorre somente por difusão (teoria do filme estagnado).

O fluxo do componente difusivo (J) através de um filme de espessura (δ) com uma difusividade molecular (D_m) está relacionado com a variação de concentração (ΔC). Esta relação é estabelecida através da Primeira Lei de Fick :

$$J = \frac{Q}{A} = \frac{-D_m}{\delta} \Delta C \quad (1)$$

em que:

- Q é o caudal molar do componente difusivo;
- A é a área interfacial total.

O coeficiente de transferência de massa k pode ser assumido como sendo $\frac{Dm}{\delta}$. Desta forma o fluxo molar é dado por:

$$J = k \Delta C \quad (2)$$

Em estado estacionário, o fluxo molar da espécie difusiva é o mesmo quer do lado do filme do gás, quer do lado do filme do líquido. Desta forma, a equação 2 pode ser escrita:

$$Q = kGA(C_G - C_G^i) \quad (3)$$

$$Q = kLA(C_L^i - C_L) \quad (4)$$

Em que:

- k_G e k_L são os coeficientes peliculares de transferência de massa do gás e do líquido, respectivamente.
- C_G e C_G^i são a concentração do componente difusivo no seio do gás, longe da interface e a concentração do componente difusivo na interface, respectivamente;
- C_L e C_L^i são respectivamente a concentração do componente difusivo, no seio do líquido longe da interface e a concentração do componente difusivo na interface, do lado do líquido;

Pela lei de Henry C_L^* está relacionada com a concentração do componente difusivo no seio do gás:

$$C_L = H C_L^* \quad (5)$$

em que H é a constante de Henry adimensional.

Pela mesma lei de Henry:

$$C_G^i = H C_L^i \quad (6)$$

Rearranjando a equação 3 e utilizando as substituições dadas pelas equações 5 e 6 e somando com a equação 4, obtemos a seguinte expressão:

$$Q = k_L a (C_L^* - C_L) \quad (7)$$

Em que:

- k_L é o coeficiente global de transferência de massa baseada no filme do lado do líquido.
- C_L^* é a concentração do componente difusivo no líquido que está em equilíbrio com a fase gasosa ou seja, é o valor máximo possível do componente difusivo no líquido tendo em conta as condições de temperatura, pressão.

Sabendo que:

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{Hk_G} \quad (8)$$

Poderemos assumir que o segundo termo do lado direito da equação 8 é desprezável em relação ao primeiro termo, visto que o oxigênio é um gás pouco solúvel e para esse tipo de gases, H é muito maior que a unidade ($H \approx 30$ (Chisti, 2007)) e para além disso a difusividade na fase gasosa é muito maior que na fase líquida o que faz com que k_G é maior que k_L então a equação 8 transforma-se:

$$\frac{1}{K_L} \approx \frac{1}{k_L} \quad (9)$$

Desta forma, podemos dizer que toda a resistência à transferência de massa de um gás pouco solúvel está localizada no filme estagnado do lado do líquido. Será portanto esse filme que controlará a transferência de massa. Podemos assim dizer que:

$$Q = k_L a (C_L^* - C_L) \quad (10)$$

Ou então:

$$\frac{dC_L}{dt} = k_L a (C_L^* - C_L) \quad (11)$$

Em que:

a é a área interfacial definida como sendo a razão entre a área interfacial total gás-líquido e o volume de líquido (V_L). Integrando esta equação, tendo em consideração as seguintes condições fronteira:

- Para $t=0$, $C_L = C_L^0$
- Para $t=t$, $C_L = C_L$

Vem:

$$\ln(C_L^* - C_L) = \ln(C_L^* - C_L^0) - k_L a t \quad (12)$$

Pode-se desta forma calcular $k_L a$ tendo em consideração as seguintes suposições:

- O líquido está bem agitado, e consequentemente a concentração de oxigénio é igual em qualquer ponto do líquido;
- C_L^* é constante, não ocorrendo mudança na fase gasosa;
- O oxigénio não é consumido no sistema;

O valor de $k_L a$ obtém-se traçando a recta que melhor se ajusta ao conjunto de pontos dados pela equação 12. O declive desta recta dar-nos-á o valor de $k_L a$. O valor de C_L^* parâmetro importante neste processo, e objecto de estudo também neste trabalho, ser-nos-á dado pela média dos últimos dez valores de C_L . Supõe-se assim, que a saturação estará já praticamente alcançada.

1.2.5. Coeficiente volumétrico de transferência de massa gás/líquido

O produto $k_L a$ é chamado coeficiente volumétrico de transferência de massa gás/líquido. A estimativa do $k_L a$ é importante para o projecto de equipamentos, tais como reactores.

Os valores deste coeficiente, $k_L a$, são de fácil aquisição, ao contrário dos valores de K_L que são de difícil aquisição.

No método experimental que vamos utilizar, Método Dinâmico, o valor de $k_L a$ é obtido indirectamente utilizando a equação 12. O valor da concentração de oxigénio na água C_L é obtido utilizando o eléctrodo polarográfico já referido.

Neste método usa-se um equipamento para a desoxigenação da água por borbulhamento com azoto. A partir do momento em que a concentração de oxigénio na água é praticamente nula, inicia-se a alimentação de ar reconstituído e inicia-se assim a absorção de oxigénio. Este processo continua até a água ficar saturada de oxigénio.

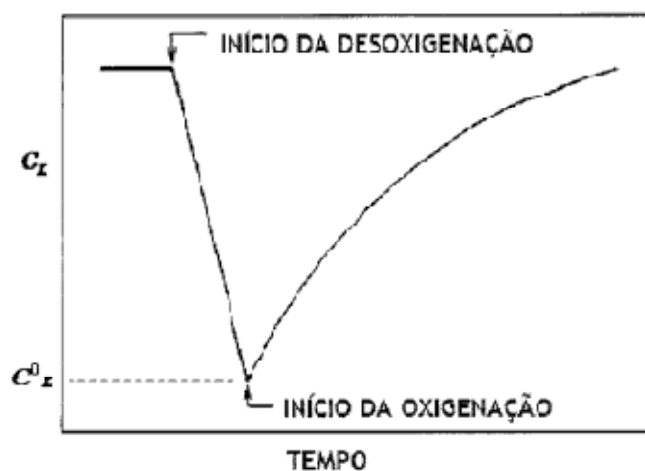


Figura 3 - Comportamento da concentração de oxigénio dissolvido durante a determinação dinâmica do coeficiente volumétrico de transferência de massa gás/líquido.

Durante este processo os valores de oxigénio dissolvido vão sendo lidos e armazenados, pelo sistema de aquisição de dados acoplado à instalação experimental, para posterior tratamento. Obtemos assim a variação da concentração de oxigénio na água ao longo do tempo.

Convém referir que existem outros métodos para determinar o valor de $k_L a$, mas este método é o mais utilizado.

Existem vários factores que podem afectar a transferência de massa, e consequentemente os valores de $k_L a$ (Chisti, 2007), e são os seguintes:

- Temperatura;
- Pressão;
- Viscosidade;
- Densidade;
- Viscosidade;
- Tensão superficial;
- Força iónica;
- pH;
- Velocidade de arejamento;
- Presença de surfactantes e iões;
- Geometria do equipamento;
- Potência fornecida;
- Parâmetros de escoamento dos fluidos não newtonianos.

Sabemos que o $k_L a$ é um parâmetro global, mas que por si só não é suficiente para explicar os mecanismos de transferência de massa. Existem outros fenómenos que ocorrem que afectam o $k_L a$ e o seu efeito conjunto não é de fácil previsão (Alves et al., 2004).

A análise em separado de $k_L a$ deve ser considerada para se compreender melhor todos os mecanismos de transferência de massa gás/líquido (Kantarci et al., 2005). Desta forma é possível dizer qual dos dois factores controla a transferência e quais as propriedades e fenómenos que ocorrem que são determinantes para o resultado final. Numa coluna de borbulhamento a variação de $k_L a$ deve-se primariamente às variações da área interfacial (Kantarci, et al., 2005).

2. Descrição experimental

2.1. Sistema experimental

O esquema da montagem laboratorial está representado no Anexo A.

Os gases que estão armazenados em reservatórios, passam através de válvulas on-off, até chegarem aos monoreductores. A pressão do controlo nestes monoreductores é de aproximadamente 1 barg. Dado que o azoto serve unicamente para a desgasificação do líquido, o controlo da pressão no azoto não terá uma importância relevante, apenas servirá para que o controlo da pressão do ar reconstituído se faça de um modo eficiente. Tem-se apenas que ter o devido cuidado para que a pressão do azoto esteja controlada, porque doutra forma poderá causar estragos (rupturas) no sistema.

Uma válvula à posteriori controlará o caudal de ar reconstituído cujo valor será lido num rotâmetro antes de entrar na coluna de borbulhamento.

Foi colocado um medidor de caudal digital imediatamente antes da entrada do ar na coluna de borbulhamento. Será este valor, lido neste caudalímetro, que servirá de base para a determinação das velocidades superficiais U_G no estudo efectuado.

Existe um humidificador de ar na instalação que tem como função saturar o ar reconstituído antes de ele entrar na coluna de borbulhamento. O volume de água neste humidificador deverá permanecer sempre constante e será aproximadamente de 200 mL.

A coluna de borbulhamento está à pressão atmosférica e funcionará numa forma semi-contínua, isto é, a experiência seguinte é completamente independente da experiência anterior.

O volume da coluna de borbulhamento é de aproximadamente 3 L. Esta coluna é feita em perspex. O distribuidor de gás existente nesta coluna é do tipo prato perfurado, sendo este também feito em perspex e constituído por treze agulhas, distribuídas uniformemente, cujo diâmetro interno é de 0.3 mm. Esse distribuidor encontra-se representado na figura

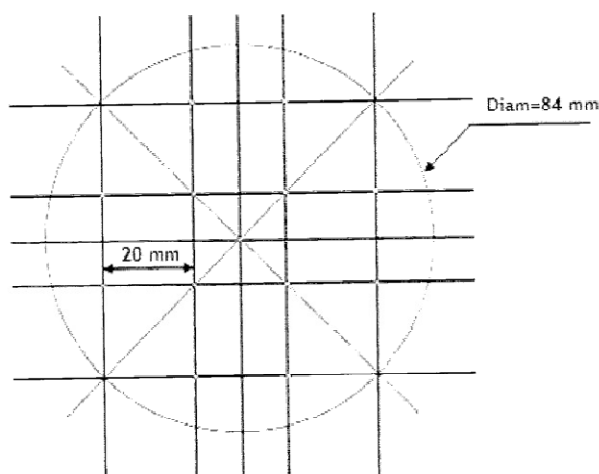


Figura 4 - Esquema do prato perfurado, distribuidor de gás estático.

Em cada experiência, a coluna era carregada com as cargas adequadas (1,3L; 1,8L e 2,3L) e a temperatura de cada experiência era fixada pela termoestatização da coluna de borbulhamento, assim como a termoestatização do gás absorvido (ar reconstituído).

A termoestatização do gás absorvido foi feita mergulhando o tubo de gás a injectar na coluna numa tina com água a uma temperatura adequada para elevar a temperatura do gás (normalmente a 17°C) até à temperatura a que o líquido se encontrava (temperaturas de: 20°C; 25°C e 30°C). Operou-se de modo a que a diferença entre a temperatura do líquido e a temperatura do gás fosse inferior a 0,5°C.

O cálculo da temperatura do banho que procedeu ao aquecimento da corrente de gás a injectar na coluna, foi alvo de um estudo paralelo que será aprofundado em situação oportuna, dado que ocorreram fenómenos “interessantes”, na área da transferência de calor, que convirá posteriormente estudar.

A medição da concentração de oxigénio no líquido foi feita em tempo real através de um medidor de oxigénio Oxi 340i da WTW equipado com um sensor de oxigénio dissolvido Cellox 325, também este da WTW.

2.2. Procedimentos experimentais

2.2.1. Procedimentos para estabilização térmica do banho de aquecimento do gás

Inicialmente foi feito um estudo de modo a relacionar a temperatura da água do banho de aquecimento do gás, com a temperatura do gás pretendida (20°C; 25°C e 30°C), estudo esse que, como já foi dito, ofereceu um tema de trabalho que se poderá considerar importante. Em cada experiência, e tendo em conta esse estudo, era estabelecida a temperatura do banho de modo a obter a temperatura do gás pretendida.

Dependendo da temperatura de operação, iniciava-se o aquecimento do banho com a antecedência necessária através de uma resistência eléctrica.

2.2.2. Procedimentos para a calibração do medidor de oxigénio dissolvido

Existem duas maneiras para proceder à calibração do aparelho medidor, tal como é descrito no manual de operação do medidor:

- Calibração através de ar saturado com vapor de água, usando a câmara para calibração Oxical-SL;
- Calibração por comparação recorrendo a uma solução para a calibração.

Neste trabalho fizemos uso da primeira forma de calibração por uma questão de simplicidade e rapidez. O fabricante do medidor não refere qual das duas formas de calibração é a mais adequada pelo que procedemos à calibração do modo atrás referido.

A calibração consiste dos seguintes passos:

1. Ligar o sensor ao medidor;
2. Ligar o medidor à corrente;
3. Ligar o aparelho;
4. Colocar o sensor de oxigénio dissolvido dentro da câmara Oxical-SL;
5. Carregar na tecla <CAL> até aparecer “O₂Cal”;
6. Carregar na tecla <RUN/ENTER> para iniciar a auto-leitura;
7. Após a medida de um valor estável, o instrumento revela o valor do declive relativo e o estado do sensor ;
8. Finalmente carrega-se em <M> para se voltar ao modo normal de operação.

2.2.3. Procedimentos para a saturação da coluna de água com ar

Procede-se do seguinte modo:

1. Abrir as válvulas de corte dos gases.
2. Verificar junto da válvula direcciona a ligação do azoto à coluna de borbulhamento.
3. Abrir e regular a pressão de azoto na tubagem para aproximadamente 1 bar relativo.
4. Medir com proveta o volume de água da torneira ou ultrapura (1,3 L; 1,8L; 2,3L) a utilizar em cada experiência.
5. Aquecer o volume de água do ponto anterior até à temperatura desejada (20°C; 25°C; 30°C).
6. Medir o pH e a condutividade eléctrica da água referida no ponto 4.
7. Ligar o aquecimento do banho termoestático de modo a obter a temperatura do gás desejada.
8. Depois de ligar o medidor ao computador e ao sensor e depois do sistema estar devidamente calibrado, colocamos o sensor mergulhado no líquido a 10 cm de profundidade. De referir que todas as experiências foram feitas com o sensor nesta posição de modo a evitar qualquer influência que pudesse ser causada pela alteração da posição do sensor.
9. Depois de ligar o computador e com o programa de leitura e de aquisição de dados aberto, criou-se um ficheiro.
10. Procedeu-se à degasificação do sistema de modo a garantir a ausência de oxigénio dissolvido no líquido para assim se dar início à oxigenação do líquido.
11. Inicia-se a leitura e o registo de dados no programa referido. Os dados são transmitidos automaticamente do medidor para o computador com um intervalo de 5s.
12. A experiência decorre até que se obtenha a saturação do sistema, saturação essa que pode ser observada pela visualização do gráfico resultante da aquisição de dados (a linha permanece paralela a uma linha de referência horizontal ao longo do tempo).

13. Dá-se por terminada a aquisição de dados.
14. Exportam-se os dados da aquisição para um ficheiro Excel. Caso se pretenda dar início a uma nova experiência nas mesmas condições de temperatura e carga (volume de líquido), procede-se novamente à desgasificação do sistema para posterior início de uma outra experiência.
15. Tratam-se os dados.

2.2.4. Procedimento para cálculo do $k_L a$

Para o início de cada cálculo ter-se-á que determinar em primeiro lugar, a velocidade superficial do gás U_G . Esse valor é calculado dividindo o caudal de alimentação dado pelo caudalímetro, pela área da secção recta do leito da coluna de borbulhamento. O valor de $k_L a$ para cada experiência, é obtido da seguinte forma:

1. Cria-se um gráfico $C_L = f(t)$;
2. Cria-se um gráfico $\ln(C_L^* - C_L) = f(t)$ conforme a equação 12;
3. Faz-se uma regressão linear.
 - a. Ajusta-se essa regressão linear, numa primeira fase, aos pontos que se encontram na zona onde as concentrações de oxigénio sobem significativamente, no gráfico $C_L = f(t)$;
 - b. Procura-se ajustar o coeficiente de determinação ao melhor valor, aumentando ou diminuindo o grupo de pontos de interesse, por tentativa erro. Quanto maior o número de pontos, melhor;
 - c. Quando se atinge o valor máximo, para o coeficiente de correlação, o valor absoluto do declive é retirado.

Um parâmetro importante no cálculo, é sem dúvida o valor de C_L^* . Esse valor poderá condicionar de uma forma importante os valores de $k_L a$ obtidos. Será a forma como esse C_L^* for considerado, que dependerá em grande parte a razoabilidade dos valores de $k_L a$ obtidos.

Existiam para valores de C_L^* , 3 hipóteses possíveis:

- A média dos dez últimos valores obtidos na aquisição de dados que “corresponderiam” à saturação do sistema;
- Os valores dados pela literatura para a saturação desse sistema nas condições de temperatura e pressão utilizadas na experiência;
- Valores de saturação nas condições de temperatura e pressão, obtidos através de experiências complementares realizadas no decurso deste trabalho, experiências essas que ocorreriam num espaço de tempo entendido suficientemente longo, para obter as referidas condições de saturação C_L^* .

Entendeu-se que a utilização de valores para C_L^* dados pela literatura, não seriam os mais aconselháveis para este trabalho, dado que as condições de trabalho com os seus vícios e lacunas, estariam de alguma forma em oposição com as condições dadas pela literatura e como tal, os resultados obtidos não teriam a correspondência devida, ou seja, entendeu-se utilizar os parâmetros obtidos nas condições de operação.

Visto que as experiências complementares para a determinação dos valores de saturação, mostraram que esses valores não eram muito diferentes dos obtidos nas condições em que cada experiência se realizou, entendeu-se por bem utilizar o primeiro critério para valores de saturação, ou seja, a média dos dez últimos valores obtidos imediatamente antes do fim da aquisição de dados na oxigenação.

3. Resultados e discussão

3.1. O sistema bifásico ar reconstituído/água da torneira

Como já foi referido, procurou-se estudar a influência de vários parâmetros na transferência de massa gás/líquido, neste caso para o sistema ar reconstituído/ água da torneira.

Procurou-se estudar a influência da temperatura nesse processo de transferência de massa bem como a influência da carga de líquido na coluna de borbulhamento (entenda-se altura de líquido na coluna). Estudou-se também a influência da velocidade superficial do gás, U_G , no processo de transferência.

Realizaram-se várias experiências, fazendo variar sempre a velocidade superficial do gás juntamente com uma nova condição operatória, fosse ela de temperatura ou de carga de líquido. Como exemplo fixava-se uma temperatura e uma carga e realizava-se para essas duas condições uma bateria de experiências a diferentes velocidades superficiais do gás, U_G . Em média faziam-se oito experiências diferentes, cada uma a uma velocidade superficial, U_G , determinada para cada condição de temperatura e carga.

As temperaturas que foram testadas (de líquido e gás) foram de 20, 25 e 30°C. Recorde-se que se procurou desde o início deste estudo, que essas temperaturas fossem o mais semelhante possível. As cargas utilizadas foram 1,3 L, 1,8 L e 2,3 L.

3.1.1. Influência da temperatura e da velocidade superficial do gás

Os resultados obtidos nas experiências descritas atrás são representados nas Figuras 5,6 e 7.

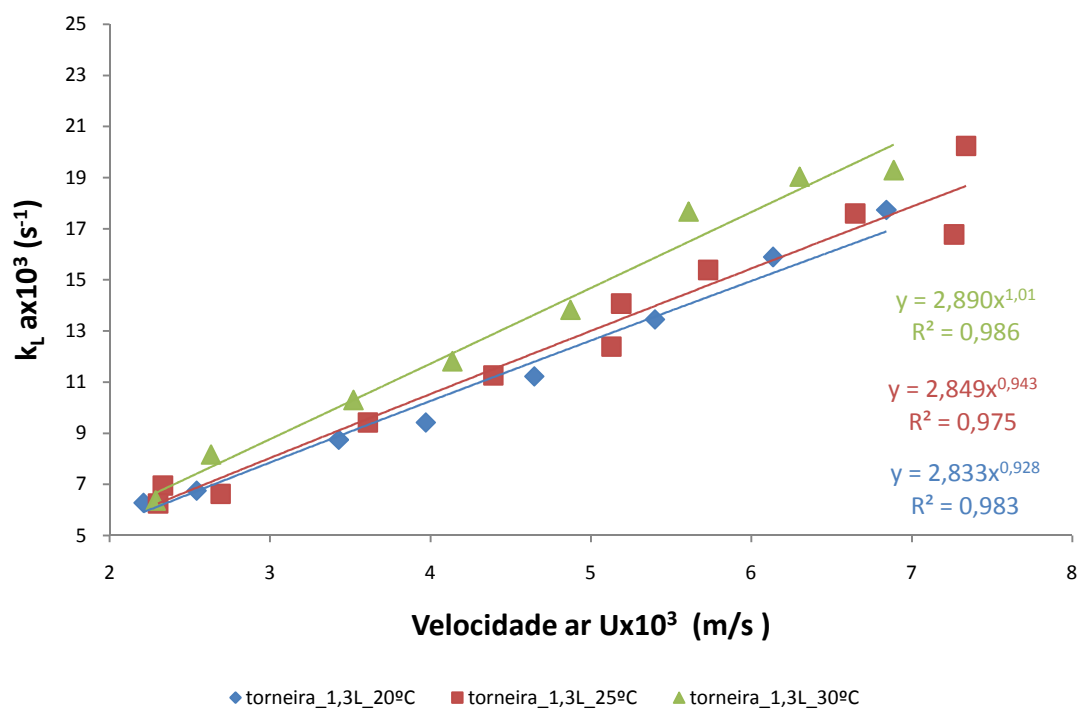


Figura 5 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa (K_La) com a velocidade superficial do gás (U_G), a diferentes temperaturas para a carga de 1,3 L.

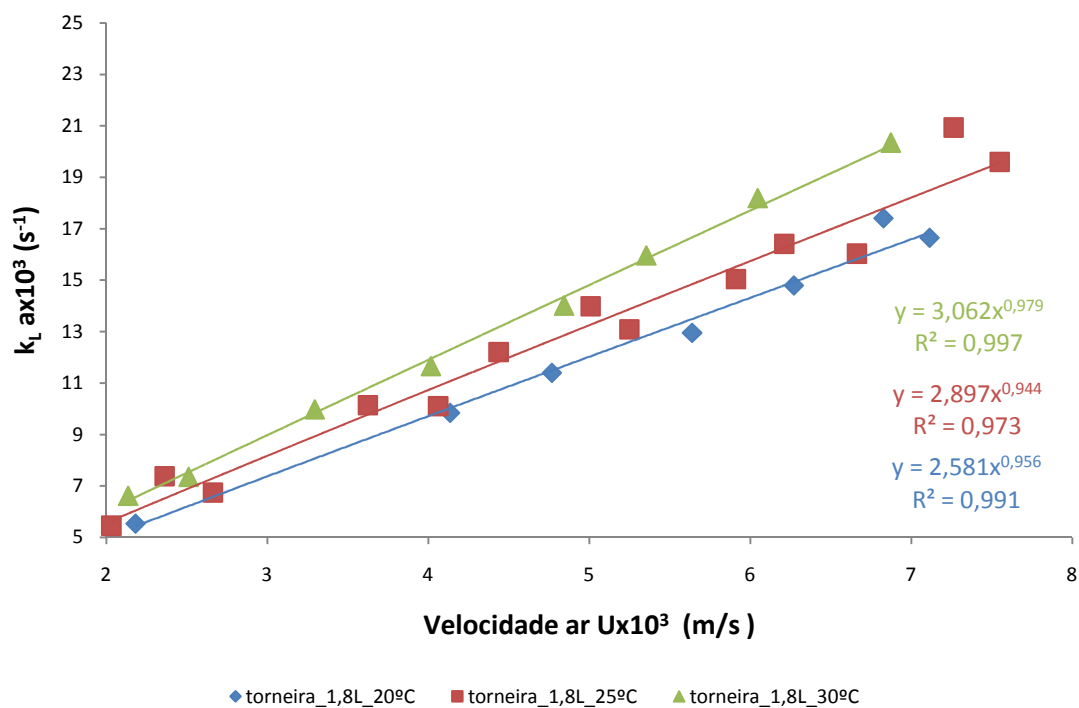


Figura 6 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa (K_La) com a velocidade superficial do gás (U_G), a diferentes temperaturas para a carga de 1,8L.

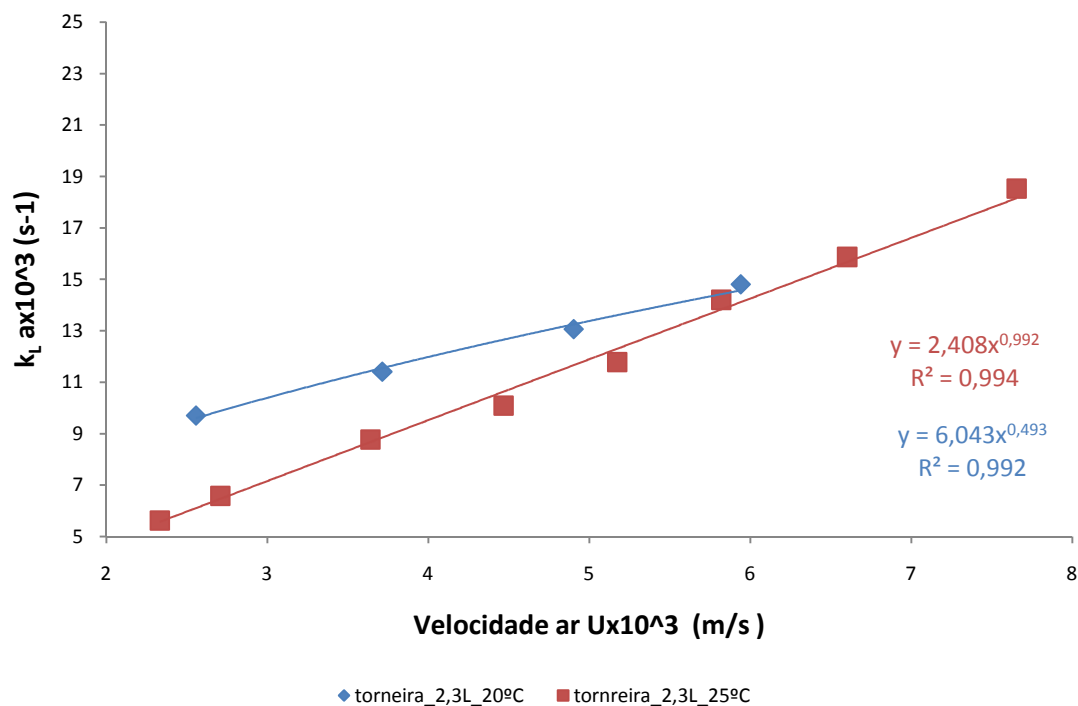


Figura 7 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_L a$) com a velocidade superficial do gás (U_G), a diferentes temperaturas para a carga de 2,3L.

Pela análise das figuras anteriores, constata-se que:

- À medida que aumenta a velocidade superficial do gás tal, como se esperava, aumentam também os valores do coeficiente volumétrico de transferência de massa (Mena, 2005, Chaumat, et al., 2005, Wang, et al., 2007);
- A medida que aumenta a temperatura, aumentam também os referidos coeficientes, dado que a um aumento de temperatura corresponde um aumento da difusividade do gás;
- O aumento da carga não provoca uma alteração significativa dos valores de $k_L a$.

Dado que um dos objectivos pretendidos com este trabalho tinha por fim a comparação com resultados obtidos em trabalhos anteriores (Mena, 2005 e J.Costa, 2008) a figura seguinte ilustra essa comparação.

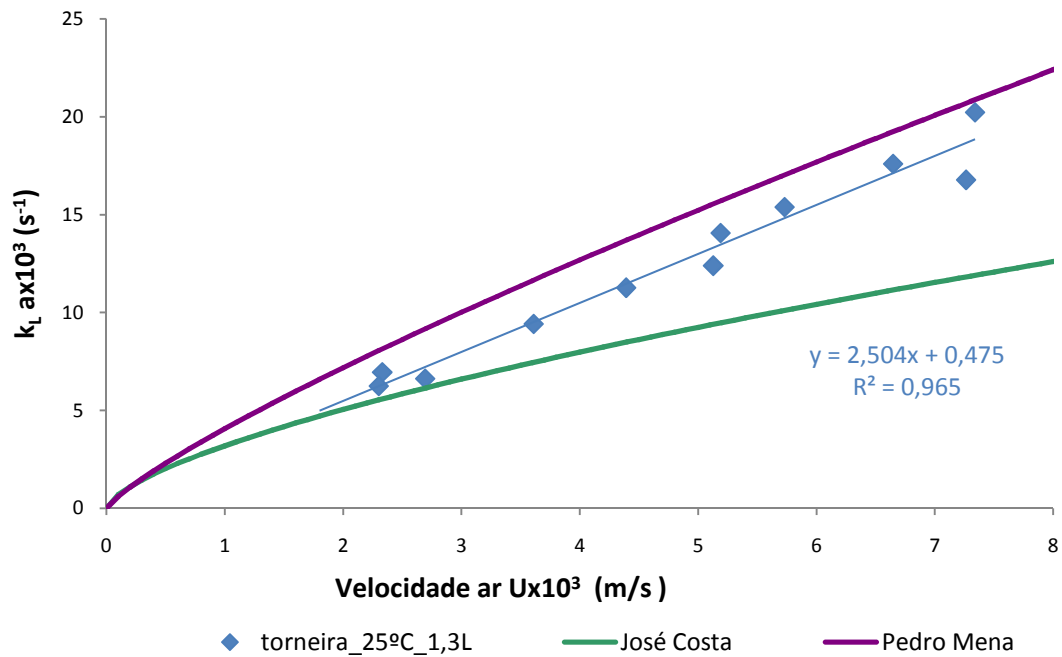


Figura 8 - Comparação dos valores $k_L a$ obtidos neste trabalho e em trabalhos anteriores nas mesmas condições de temperatura e carga.

Escolheu-se para esta figura situações análogas realizadas nos três trabalhos, ou seja: $T=25^\circ\text{C}$, carga 1.3 L e água da torneira. Os valores de $k_L a$ obtidos neste trabalho estão representados a azul e encontram-se entre os dois trabalhos anteriormente realizados.

Estes valores são superiores aos encontrados por J. Costa, 2008. Sabemos que as condições experimentais disponíveis e utilizadas nesse trabalho não foram as ideais, nomeadamente no controlo da temperatura, tendo-se, também apurado a existência de uma pequena fuga de ar na instalação. Sabendo que um aumento da velocidade superficial U_G contribui para um aumento dos valores de $k_L a$ então a existência de fugas de ar na instalação contribuirá para uma redução dos valores encontrados nesse trabalho.

Por outro lado, os valores de $k_L a$ encontrados por Mena, 2005 no seu trabalho são superiores aos obtidos neste trabalho. Sabemos que no processo de cálculo utilizado no referido trabalho foi utilizada uma concentração de saturação do oxigénio em água C_L^* dada pela literatura. Uma das premissas utilizadas neste trabalho foi que a temperatura do gás e do líquido deveriam ser aproximadamente a mesma. Se a temperatura do ar reconstituído a injectar for diferente da temperatura do líquido, e era neste caso manifestamente inferior, variava entre os 15°C e os 17°C , e estando o líquido a 25°C , a temperatura na interface gás/líquido iria ser inferior a 25°C , donde os valores da concentração de saturação C_L^* seriam superiores aos utilizados, porque se estava efectivamente a trabalhar com uma temperatura inferior.

Os valores de $k_L a$ obtidos desta forma seriam inevitavelmente superiores.

3.1.2. Influência da carga

Procurou-se com um conjunto de experiências avaliar a influência da carga (altura de líquido) neste processo de transferência de massa. Nesta situação fixava-se a temperatura do líquido e do gás e fazia-se para cada uma dessas temperaturas uma alteração na carga de líquido (1,3L, 1,8L e 2,3L). Para cada carga e temperatura realizava-se uma bateria de experiências a diferentes velocidades superficiais de gás.

Os resultados obtidos encontram-se nas Figuras 9,10 e 11.

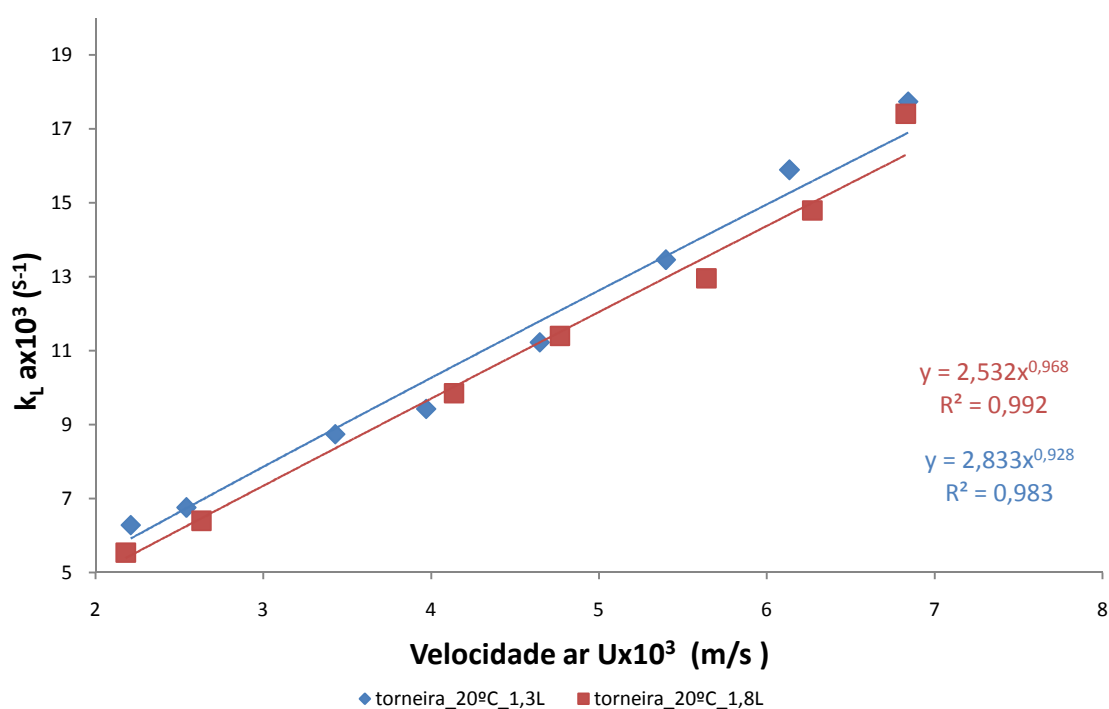


Figura 9 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa (K_L) com a velocidade superficial do gás (U_G), a diferentes cargas para a temperatura de 20°C.

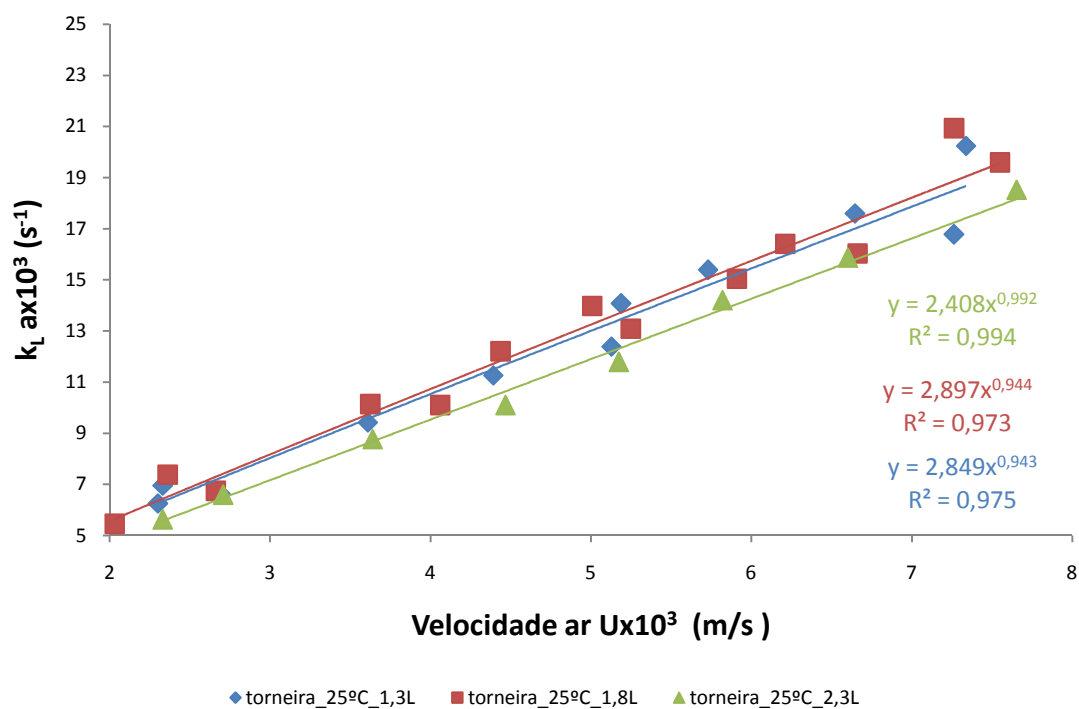


Figura 10 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa (K_L) com a velocidade superficial do gás (U_G), a diferentes cargas para a temperatura de 25°C.

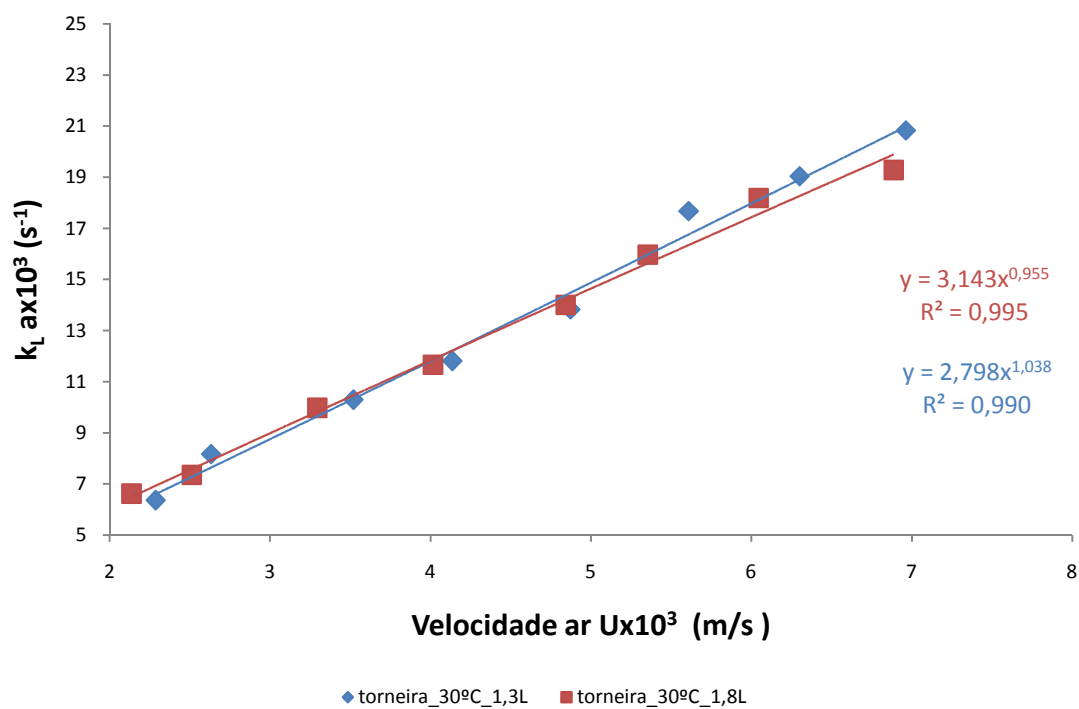


Figura 11 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa (K_L) com a velocidade superficial do gás (U_G), a diferentes cargas para a temperatura de 30°C.

Através de uma análise dos resultados obtidos nestas experiências em que se comparou o efeito da carga de líquido (altura de líquido) sobre o processo de transferência de massa para diferentes temperaturas constata-se o seguinte:

- A carga de líquido não parece ter uma importância muito relevante neste processo. Mas constata-se que ela existe de qualquer das formas e poderá ser devida a efeitos hidrodinâmicos;
- Verifica-se também que quanto mais alta é a temperatura menor é a influência da carga do líquido no processo de transferência de massa.

3.2. Sistema ar reconstituído/água ultrapura

Como já foi referido, procurou-se estudar a influência de vários parâmetros na transferência de massa gás/líquido, neste caso para o sistema ar reconstituído/água ultrapura (desionizada).

Procurou-se estudar a influência da temperatura e da velocidade superficial do gás U_g neste processo de transferência de massa. O efeito da influência da carga de líquido na coluna de borbulhamento não foi considerado neste caso.

A comparação com o sistema anterior para poder aquilatar da importância da qualidade da água impunha-se e foi realizado.

Realizaram-se várias experiências, fazendo variar sempre a velocidade superficial do gás juntamente com uma nova condição operatória, que neste caso era somente a temperatura. A carga de líquido utilizada foi sempre a mesma, 1.8 L.

Como exemplo, fixava-se uma temperatura e realizava-se uma bateria de experiências a diferentes velocidades superficiais do gás, U_g . Tal como no sistema anterior, em média faziam-se oito experiências diferentes.

As temperaturas que foram testadas de líquido e gás foram de 20, 25 e 30°C. Recorde-se que se procurou, tal como no sistema anterior, e desde o início deste estudo, que essas temperaturas fossem o mais semelhantes possível.

3.2.1. Influência da temperatura e da velocidade superficial do gás na transferência de massa no sistema ar reconstituído/água ultrapura

Na figura que se segue apresentam-se os pontos experimentais após tratamento de dados para o sistema considerado.

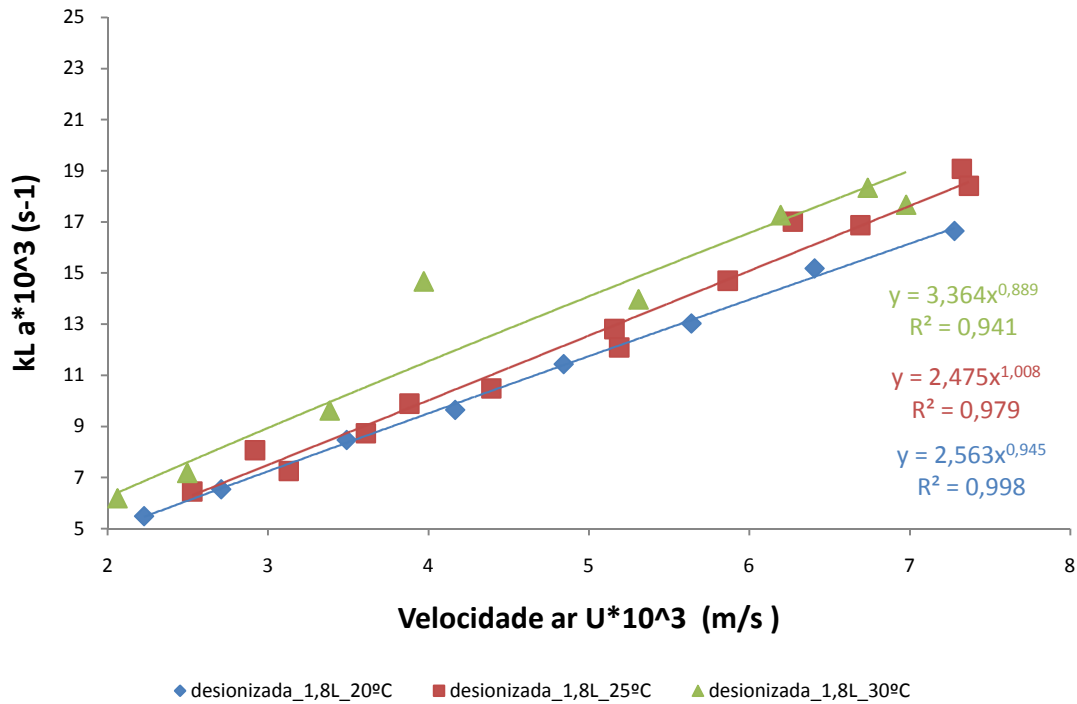


Figura 12 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_L a$) com a velocidade superficial do gás (U_G), à temperatura de 20°C, 25°C e 30°C.

Pela análise dos resultados observa-se que:

- À medida que aumenta a velocidade superficial do gás U_G aumentam também os valores de $k_L a$ (Mena, 2005, Chaumat, et al., 2005, Wang, et al., 2007).
- À medida que aumenta a temperatura, aumentam também os referidos coeficientes, dado que a um aumento de temperatura corresponde um aumento da difusividade do gás.

3.2.2. Influência do tipo de água na transferência de massa a diferentes temperaturas

Nas figuras que se seguem estuda-se a influência do tipo de água, nomeadamente água da torneira e água ultrapura, na transferência de massa.

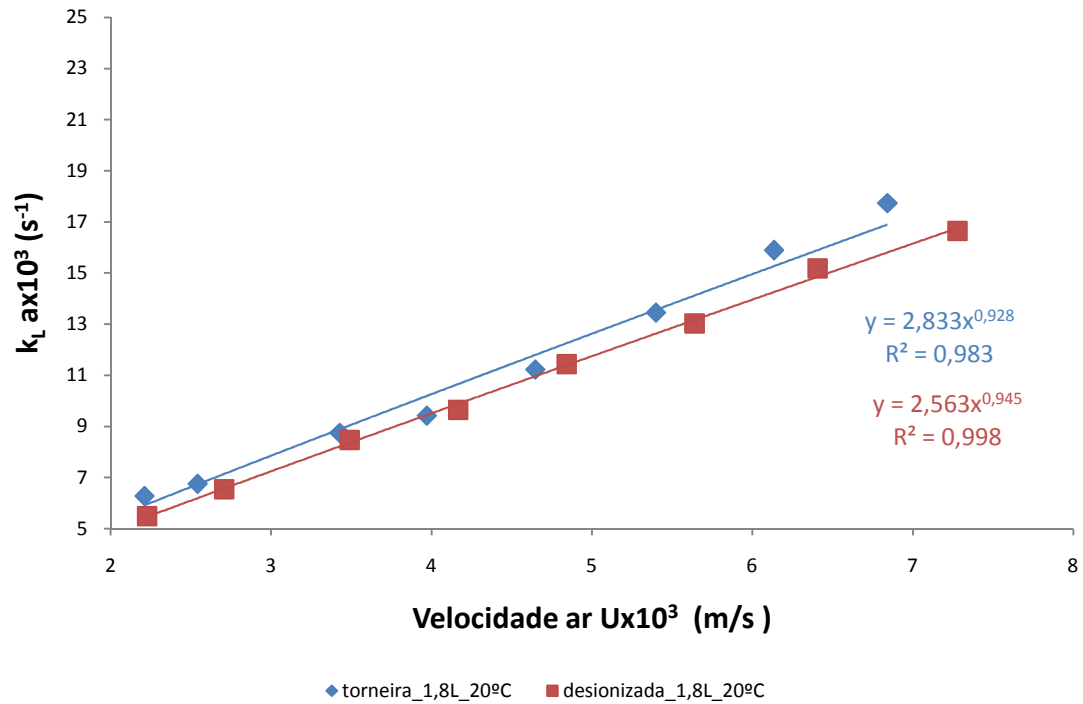


Figura 13 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_L a$) com a velocidade superficial do gás (U_G), para a água da torneira e água ultrapura à temperatura de 20°C.

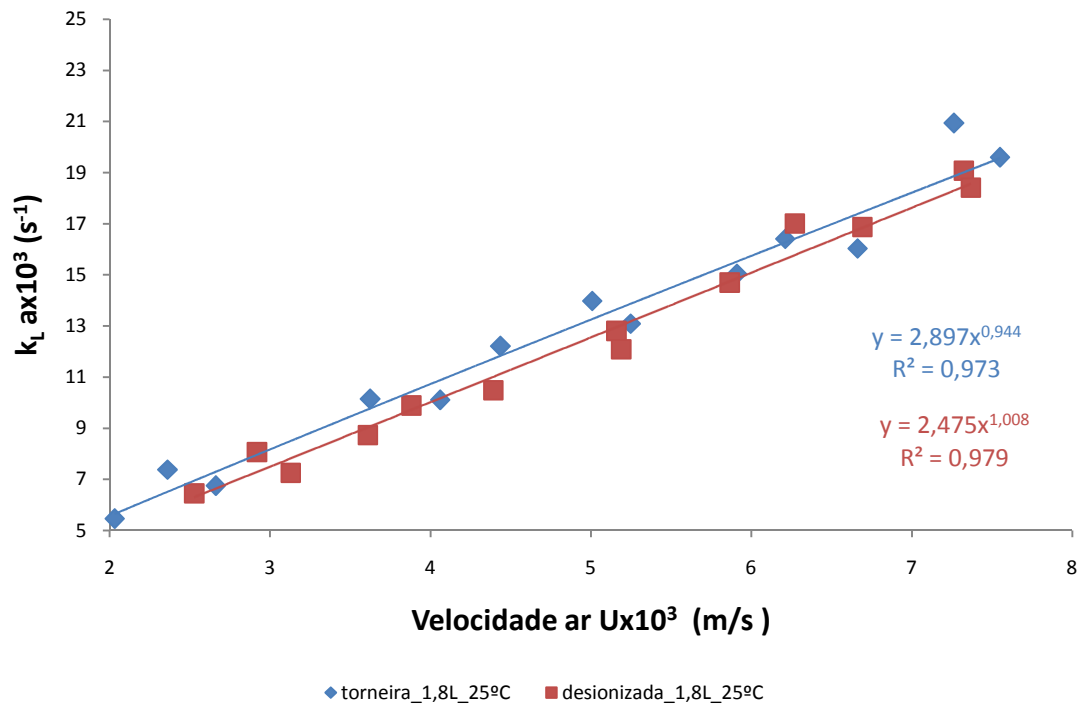


Figura 14 - Evolução do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($K_L a$) com a velocidade superficial do gás (U_G), para a água da torneira e água ultrapura à temperatura de 30°C.

Os resultados obtidos demonstram que:

- À medida que aumenta a temperatura, aumentam também os referidos coeficientes, dado que a um aumento de temperatura corresponde um aumento da difusividade do gás, independentemente de se tratar de água da torneira ou água ultrapura;
- Fica claramente demonstrado que os valores $k_L a$ para a água ultrapura são sempre inferiores aos obtidos para a água da torneira, independentemente da temperatura, embora essa diferença não seja muito significativa. Esta situação foi observada, entre outros, por (Anderson;Quinn,1970). Segundo estes autores, quanto mais pura é a água maior é a taxa de coalescência com evidente prejuízo para os valores de $k_L a$.

4. Conclusões

Podemos concluir, para a coluna de borbulhamento utilizada e nas condições operatórias praticadas que:

- Em todas as situações, a um aumento da velocidade superficial, U_G , do gás correspondeu sempre um aumento dos valores de $k_L a$;
- Quanto mais alta a temperatura maior o valor de $k_L a$;
- A carga de líquido tem alguma influência no valor de $k_L a$;
- Quanto mais alta for a temperatura menor é a influência da carga de líquido;
- O valor de $k_L a$ é influenciado pela presença de íons em solução. O valor de $k_L a$ para a água da torneira é superior ao da água ultrapura.

Este estudo apresenta algum grau de incerteza, nomeadamente quanto à influência da carga nos valores de $k_L a$. O autor acredita que a carga tem influência, ainda que pequena, nos valores de $k_L a$. A maior carga corresponderá valores inferiores para $k_L a$, e sendo o seu efeito “diluído” pelo aumento da temperatura.

5. Avaliação do trabalho realizado

5.1. Objectivos atingidos

Podemos dizer que os principais objectivos foram alcançados. A monitorização da transferência de massa neste sistema bifásico, ar reconstituído/água, foi estudada bem como alguns parâmetros que a poderiam afectar, tais como, temperatura, carga de líquido, velocidade superficial do gás e a qualidade da água utilizada.

Os valores encontrados para os coeficientes $k_L a$ e a sua comparação com valores obtidos em trabalhos anteriores realizados neste laboratório estão em sintonia com o esperado para as condições em que este trabalho decorreu e as condições em que os anteriores trabalhos decorreram. Pensa-se que foram dadas as explicações razoáveis para a discrepância de valores encontrados neste trabalho e nos anteriores.

Quanto à influência da carga de líquido nos valores de $k_L a$ alguma incerteza existirá, mas pensa-se que essa influência existirá se bem que não seja muito significativa. Será eventualmente um interessante tema de estudo para trabalhos futuros.

5.2. Limitações e trabalho futuro

Como foi dito no início deste trabalho, procurou-se reduzir ao mínimo os factores que pudessem alterar significativamente a verdade dos valores de $K_L a$. Por essa razão, o controlo da temperatura foi sempre entendido como sendo vital em todo este trabalho. Julga-se que esse objectivo foi alcançado. Contudo poderiam existir outros factores tais como:

- A pressão atmosférica nos momentos em que os ensaios foram realizados. Valores diferentes para a pressão atmosférica acarretariam inevitavelmente um erro por mais pequeno que fosse, nos valores de $K_L a$ obtidos. Facilmente se compreenderá que o controlo do valor da pressão atmosférica era de todo o modo praticamente impossível;
- A eventual má calibração e funcionamento do eléctrodo medidor da concentração de oxigénio na água poderá também induzir em erro os valores de $k_L a$;
- A medição do caudal de ar injectado no líquido;
- Eventuais pequenas fugas de ar que teriam de forçosamente ser pequenas dado o enorme cuidado que houve na sua anulação;
- O eventual erro humano sempre inerente a estes processos.

Para trabalhos futuros recomenda-se o seguinte:

- Projectar um novo sistema experimental em que haja possibilidade de se proceder a um controlo da temperatura de uma forma completamente eficaz. Sistema esse que possa também anular por completo as fugas de ar que possam existir no percurso do gás entre a sua medição e a injeção no líquido;
- A definição de critérios objectivos na escolha de parâmetros utilizados no cálculo tais como a concentração e saturação na solução, C_L^* . A má ou deficiente escolha destes valores poderá inevitavelmente acarretar um erro nos valores de K_La encontrados;
- A continuação do estudo da influência da carga de líquido no processo de transferência, porque pensa-se que esta tem influência na hidrodinâmica da coluna (reactor) com as consequentes melhorias ou prejuízos da “performance” da coluna;
- A alteração de algumas condições operatórias tais como, o controlo do pH, e a adição de agentes que possam de alguma forma alterar o equilíbrio deste processo, como por exemplo a adição de agentes tensioactivos.

5.3. Apreciação final

Foi gratificante a presença neste laboratório e ter-se tido o prazer de conviver com pessoas dedicadas e “experts”, neste processo tão interessante como é a transferência de massa em sistemas bifásicos.

Poder-se aumentar o conhecimento destas matérias e adquirir-se assim um “know how” que poderá ser extremamente útil na via profissional.

Aprofundar-se o espírito de trabalho em equipa que esteve sempre presente nos elementos que constituem este sector de investigação

A certeza plena de que se terminou o trabalho com muito mais conhecimento do que o que se tinha no seu início.

6. Referências

- Alves, S. S.; Maia, C. I.; Vasconcelos, J. M. T. - Gas-liquid mass transfer coefficient in stirred tanks interpreted through bubble contamination kinetics. *Chemical Engineering and Processing*. 43:7 (2004). p. 823-830.
- Anderson, J. L.; Quinn, J. A. - The transition to slug flow in bubble columns. *Chemical Engineering Science*. 25:2 (1970). p. 340-341.
- Bird, R. B.; Stewart, W. E.; Lightfoot, E. N. - *Transport Phenomena*. Wiley International Edition, 1960.
- Blanch, Harvey; Clark, Douglas S. – *Biochemical Engineering* p. 364-389.
- Chaumat, H., et al. - Mass transfer in bubble column for industrial conditions-effects of organic medium, gas and liquid flow rates and column. *Chemical Engineering Science*. 60:22 (2005). p. 5930-5936.
- Chisti, Yusuf - *Mass Transfer*. John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- Coulson, J. M.; Richardson, J. F. - *Tecnologia Química*. 3a. Fundacao Calouste Gulbenkian, 1986.
- Deckwer, W. D.; Burckhart, R.; Zoll, G. - Mixing and mass transfer in tall bubble columns. *Chemical Engineering Science*. 29:11 (1974). p. 2177-2188.
- Dudley, J. - Mass transfer in bubble columns: a comparison of correlations. *Water Research*. 29:4 (1995). p. 1129-1138.
- Jamialahmadi, M., et al. - Study of Bubble Formation Under Constant Flow Conditions. *Chemical Engineering Research and Design*. 79:5 (2001). p. 523-532.
- Kantarci, N.; Borak, F.; Ulgen, K. O. - Bubble column reactors. *Process Biochemistry*. 40:7 (2005). p. 2263-2283.
- Mena, Pedro Miguel Pacheco Neves Carteado - *Mass transfer and hydrodynamics in multiphase systems*. Porto: [s.n.], 2005.
- Middleman, S. - *An Introduction to Mass and Heat Transfer*. 1st. John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- Vandu, C. O.; Krishna, R. - Gas Holdup and Volumetric Mass Transfer Coefficient in a Slurry Bubble Column. *Chemical Engineering & Technology*. 26:7 (2003). p. 779-782.
- Wang, T.; Wang, J.; Jin, Y. - Slurry Reactors for Gas-to-Liquid Processes: A Review. *Ind. Eng. Chem. Res.* 46:18 (2007). p. 5824-5847.

- Welty, J. R., et al. - Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer. 5th. John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- Zehner, P.; Kraume, M. - Bubble Columns. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2005.

Anexo A – Esquema e foto da montagem laboratorial

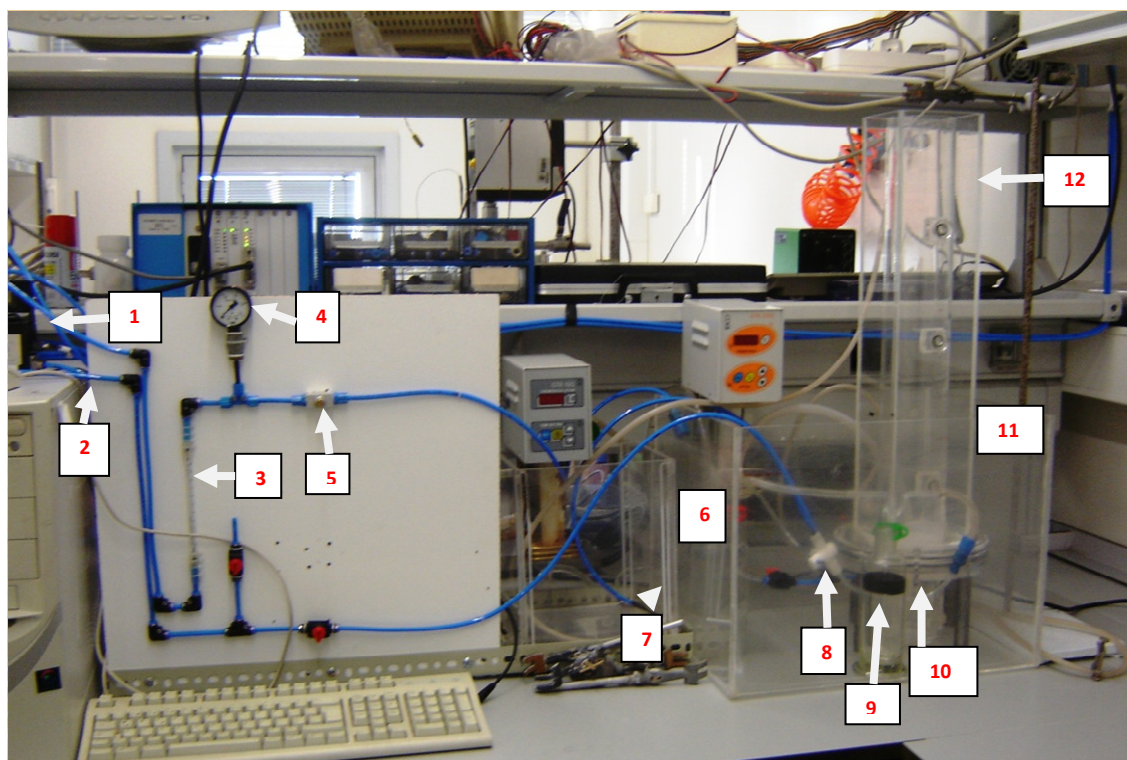


Figura A.1 – Fotografia da instalação laboratorial usada para os experimentos de determinação dos coeficientes de massa gás/líquido.

Legenda:

1. Linha de ar reconstituído.
2. Linha de azoto.
3. Rotâmetro.
4. Manómetro.
5. Válvula de controlo (one way flow).
6. Banho termoestático 1.
7. Humidificador do ar.
8. Válvula direcciona1 de 3 vias.
9. Caudalímetro.
10. Termopar.
11. Banho termoestático 2.
12. Coluna de borbulhamento de Perspex.

Anexo B – Esquema e características da coluna de borbulhamento

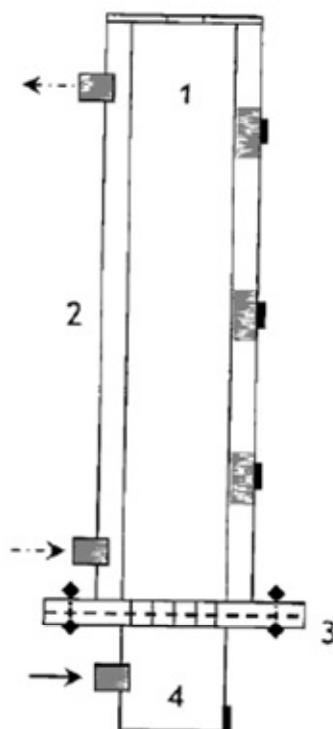


Figura B.1 – Esquema da coluna de borbulhamento.

Estrutura	Características	Dimensões (mm)
1 Coluna cilíndrica	altura	600
	diâmetro interno	84
	espessura	3
2 Camisa quadrangular	altura	600
	largura	110
	espessura	8
3 Distribuidor de gases	espessura	5
4 Câmara gasosa	altura	100
	diâmetro interno	84
	espessura	3

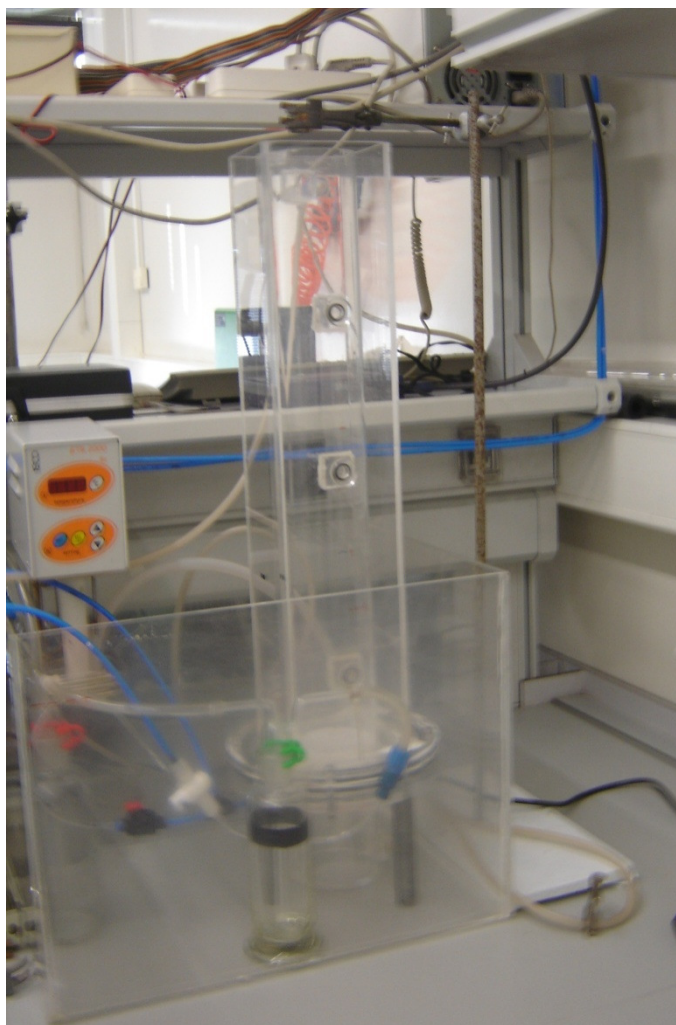


Figura B.2 – Fotografia da coluna de borbulhamento.

Anexo C – Tabela de valores de concentração de saturação de oxigénio em água

Tabela C.1 - Tabela de solubilidades, para a água da torneira e ultrapura para as diferentes temperaturas experimentais.

Torneira			Ultrapura	
<i>T(°C)</i>	<i>Literatura (mg/L)</i>	<i>Experimental(mg/L)</i>	<i>T(°C)</i>	<i>Experimental(mg/L)</i>
20,1	9,16	8,36	19,7	8,79
24,6	8,41	7,79	25,0	7,95
29,6	7,71	7,45	29,6	7,36